工作记忆表征精度加工需求对注意引导的影响*

车晓玮　王凯旋　徐慧云　张 倩　李寿欣
（山东师范大学心理学院，济南 250358）

摘　要 采用注意捕获范式，通过行为和事件相关脑电位（ERP）实验，探讨工作记忆表征精度加工需求对注意引导的影响，行为结果发现，在低精度加工需求条件下，只有一个工作记忆表征引导注意，且处于高激活状态的工作记忆表征产生的注意捕获大于低激活状态；而在高精度加工需求条件下，有两个工作记忆表征引导注意，且处于高、低激活状态的工作记忆表征产生的注意捕获没有差异。ERP结果显示，高精度加工需求条件下诱发的 NSW 和 LPC 大于低精度加工需求条件；在高精度加工需求条件下，干扰项与记忆项匹配比不匹配时，诱发更大的 N2 和更小的 N2pc，而在低精度加工需求条件下，干扰项与记忆项匹配和不匹配时诱发的 N2、N2pc 没有差异。研究表明，工作记忆表征精度加工需求影响注意引导的机制可能是高精度加工需求下，工作记忆表征消耗的认知资源增加，搜索目标获得的资源减少，干扰项捕获的注意增加。

关键词 工作记忆表征，注意捕获，激活状态，干扰抑制

1　前言

注意和工作记忆是人类认知加工的两个重要方面，注意反映对用于进一步加工信息的选择，而工作记忆反映对信息的短暂存储和处理。一方面，注意选择信息进入工作记忆，并在工作记忆加工过程投入注意资源（Hu et al., 2016; Shen et al., 2015）；另一方面，保存在工作记忆中的表征也会引导注意，影响随后注意任务的完成（Downing & Dodds, 2004）。

近些年，研究者分别采用目标搜索范式和注意捕获范式，对工作记忆表征影响注意引导进行了大量探讨。在目标搜索范式中，工作记忆表征与搜索任务的目标项匹配，有助于个体将注意引导到搜索目标。采用目标搜索范式进行的研究发现，工作记忆中存储的表征，能够在随后的搜索任务出现之前激活感觉神经元，从而使得与该表征匹配的刺激获得竞争优势，产生基于工作记忆的注意引导，促进视觉搜索（Desimone & Duncan, 1995; Soto et al., 2005）。Houtkamp 和 Roelfsema（2009）比较了不同数量搜索目标对注意引导的影响，结果发现，与搜索 1 个目标相比，搜索 2 个目标时，搜索任务成绩降低，产生双目标搜索损耗，这种损耗可以由单模板模型预测，这说明，一次只有一个工作记忆表征引导注意。Ort 等人（2017）采用眼动技术，控制搜索序列中目标项数量，探讨认知控制在双目标搜索

收稿日期：2020-05-13
*国家自然科学基金（31871100）资助。
通信作者：李寿欣，E-mail：shouxinli@sdnu.edu.cn；张倩，E-mail：zhangqian_psy@126.com

中的作用，结果发现，当搜索序列中只有 1 个目标项时，试次间目标变化的眼跳潜伏期长于试次间目标不变；当搜索序列中有 2 个目标项时，试次间目标变化与否不影响眼跳潜伏期。这说明，在进行双目标搜索时，一次只能激活 1 个目标模板引导注意，转换目标模板需要进行认知控制，从而产生双目标搜索损耗。而 Beck 和 Hollingworth（2017）采用眼动技术，先后呈现 2 个搜索目标，分别对应于先后呈现的 2 个搜索序列，探讨能够同时引导注意的表征数量，发现当第二个搜索序列中出现第一个搜索序列的目标时，对 2 个目标的注视概率相同，说明两个搜索序列中的目标均能引导注意，即可以同时有两个工作记忆表征引导注意。另有研究者采用事件相关脑电位（event-related potential, ERP）技术，以反映注意资源投入的后部对侧差异波（N2-posterior contralateral component, N2pc）为指标，探讨单目标和双目标对注意引导的影响，结果发现，在进行单目标搜索和双目标搜索时，搜索目标诱发的 N2pc 没有差异，说明注意资源可以灵活分配给不同搜索目标，工作记忆中存储的多个目标表征可以同时引导注意（Berggren & Eimer, 2018）。Kerzel 和 Witzel（2019）从工作记忆资源分配角度，探讨多项目工作记忆表征对注意引导的影响，结果发现，单目标搜索和双目标搜索时，位置线索对注意产生相同的促进效应；区分搜索目标和干扰项后，仅搜索目标能促进注意搜索，且搜索目标的记忆精度高于干扰项，这表明，当分配到两个表征的工作记忆资源均等时，可以同时有两个工作记忆表征引导注意；当分配到两个表征的工作记忆资源不均等时，只有获得工作记忆资源多的表征能够引导注意。总之，采用目标搜索范式进行的研究表明，事先存储的工作记忆表征可以促进后续的注意引导，且工作记忆资源分配影响注意引导的表征数量。

在注意捕获范式中，工作记忆表征与搜索任务的干扰项匹配，需要抑制对匹配干扰项的注意。在采用注意捕获范式进行的研究发现中，工作记忆表征如何影响注意引导存在争议。一些研究发现（Woodman & Luck, 2007; Arita et al., 2012; Wen et al., 2018），与工作记忆表征匹配的干扰项不能吸引注意。Woodman 和 Luck（2007）要求被试在记忆 1 个色块后，完成彩色兰道环朝向的搜索任务，结果发现，不论干扰项与记忆项匹配与否，搜索任务的反应时没有差异，说明与工作记忆表征匹配的干扰项不能自动捕获注意。在明确工作记忆表征不会作为搜索目标的情况下，当搜索序列中出现与工作记忆表征匹配的干扰项时，完成搜索任务的反应时快于不出现干扰项时，这说明个体可以有效抑制与工作记忆表征匹配的干扰项捕获注意，减少注意引导（Arita et al., 2012; Wen et al., 2018）。另有研究者采用记忆项与检测项差异程度小的记忆任务进行的研究发现，与工作记忆表征匹配的干扰项可以吸引注意（Hollingworth & Beck, 2016; van Moorselaar et al., 2014）。van Moorselaar 等人（2014）采用线索化范式，使得线索化项目处于高激活状态，并采用相同类别的颜色对记忆任务进行检测，探讨工作记忆表征数量对注意引导的影响，结果发现，当记忆项数量是 1 个时，干扰项与记忆项匹配条件下的反应时长于不匹配条件，产生基于工作记忆的注意捕获效应；当记忆项数量是多个且呈现线索时，仅线索化项目产生基于工作记忆的注意捕获效应，说明当工作记忆表征与干扰项匹配时，一次只有一个

高激活的工作记忆表征引导注意。Hollingworth 和 Beck（2016）采用与记忆项难以区分的项目进行记忆检测，探讨能够同时引导注意搜索的工作记忆表征数量，结果发现，记忆 2 个项目且搜索任务中有 2 个干扰项与记忆项匹配时，基于工作记忆的注意捕获效应大于记忆 1 个项目且搜索任务中有 1 个干扰项与记忆项匹配，这表明当工作记忆表征与搜索的干扰项匹配时，注意可以同时被 2 个工作记忆表征引导。

上述研究存在争议的主要原因可能与工作记忆资源投入有关。在变化记忆项和检测项差异的研究中，对记忆项加工投入的工作记忆资源是不同的（Zhang & Luck, 2011）。当记忆项与检测项差异较大，容易区分时，对工作记忆表征投入较少资源即可完成记忆检测任务，工作记忆表征不引导注意；当记忆项与检测项差异较小，难以区分时，需要对工作记忆表征投入较多资源，才能完成记忆检测任务，工作记忆表征能够引导注意。而采用线索化范式进行的研究中，线索化项目获得的工作记忆资源多于非线索化项目，线索化项目捕获注意，而非线索化项目不捕获注意。工作记忆资源投入的多少既可能影响注意模板的建立，也可能影响搜索任务中对干扰项的抑制。有研究发现，与工作记忆项目仅用于记忆检测任务相比，当工作记忆项目作为搜索任务的目标项呈现时，需要投入更多的资源用于建立注意模板，从而引导注意（Gunseli et al., 2014）。并且，在搜索任务中，存在对匹配干扰项的认知控制，这种认知控制受到投入认知资源多少的影响。当资源充足时，认知控制更易发挥作用，对搜索任务中干扰项的抑制也更为有效（Dube et al., 2016; Wen et al., 2018）。已有研究发现，当工作记忆表征与搜索目标匹配时，工作记忆资源分配影响多项目工作记忆表征对注意的引导（Kerzel & Witzel, 2019），那么，当工作记忆表征与搜索的干扰项匹配时，工作记忆资源分配是否影响工作记忆表征对注意的引导？

本研究通过控制记忆项和检测项之间的差异程度，改变工作记忆表征精度加工需求（Zhang & Luck, 2015; 李寿欣 等, 2019），操纵工作记忆表征过程认知资源投入，探讨注意捕获范式下工作记忆表征对注意引导的影响。工作记忆表征精度是指工作记忆表征的精确性，提高工作记忆表征精度加工需求（以下简称精度加工需求），需要在工作记忆表征过程中投入更多认知资源（Bays & Husain, 2008; Machizawa et al., 2012）。本研究共包括 4 个实验：在实验 1 中呈现 1 个记忆项，探讨单项目工作记忆表征精度加工需求对注意引导的影响。提高表征精度加工需求时，消耗更多工作记忆资源（Bays & Husain, 2008），使得用于搜索任务中抑制干扰的资源减少，干扰效应增加。因此，假设 1 是，高精度加工需求条件下基于工作记忆的注意捕获效应大于低精度加工需求条件。在实验 2 中呈现 2 个记忆项，采用线索化范式改变记忆项的表征状态，探讨精度加工需求对注意引导的影响是否是由于改变了工作记忆表征的激活状态。在高精度加工需求条件下，工作记忆表征数量和表征精度加工需求提高均会增加认知资源的消耗，无论工作记忆表征的激活状态高还是低，由于完成注意任务的资源不足，干扰项会产生较大干扰；在低精度加工需求条件下，由于线索的存在，相比于非线索化项目，

线索化项目处于高激活状态，较难抑制，产生的干扰更大。因此，假设 2 是，高精度加工需求条件下，高、低激活项目基于工作记忆的注意捕获效应没有差异；低精度加工需求条件下，高激活项目基于工作记忆的的注意捕获效应大于低激活项目。在实验 3 中呈现 1 个或 2 个记忆项，并控制搜索任务中匹配干扰项数量，探讨能够同时引导注意的工作记忆表征数量。由于工作记忆表征数量和表征精度加工需求增加，工作记忆资源消耗增加，使得用于完成注意任务的资源不足，干扰项会产生较大干扰。因此，假设 3 是，高精度加工需求条件下，可以有两个工作记忆表征同时引导注意；而低精度加工需求条件下，只有一个工作记忆表征引导注意。在实验 4 中，采用 ERP 技术，以反映冲突监测和认知控制的 N2 成分（Heil et al., 2000）和反映注意资源分配的 N2pc（Eimer, 1996）为指标，进一步探讨工作记忆表征精度加工需求影响注意引导的机制。由于在视觉搜索中，增加工作记忆表征精度加工需求占用更多认知资源，而干扰抑制的认知控制资源相应减少，因此，假设 4 是，与低精度加工需求条件相比，高精度加工需求条件下诱发更大的 N2 和更小的 N2pc。

2　实验 1　单项目工作记忆表征精度加工需求对注意引导的影响

参照以往研究（Zhang & Luck, 2015），改变记忆项和检测项之间的差异程度对表征精度加工需求进行操纵，探讨高、低精度加工需求条件下，单项目工作记忆表征对注意引导的影响。由于在低精度加工需求条件下，被试可能对记忆项进行语音编码，从而影响注意引导（Olivers, 2009），在实验 1 中对语音编码进行了操纵，探讨抑制和促进语音编码时工作记忆表征对注意引导的影响。

2.1 方法

2.1.1 被试

采用 G*Power 3.1 软件，设置统计检验力为 0.80，α 水平为 0.05，效应量为中等水平（f = 0.25）（Cohen, 1992），计算被试样本量为 19。选取某大学 20 名在校大学生参与实验，其中，男生 6 名，年龄 18.95±0.89 岁。所有被试视力或矫正视力正常，无色盲或色弱情况，无精神病史，均未参加过类似实验，实验后给与报酬。

2.1.2 仪器和材料

采用 E-prime 1.1 编制实验程序，在计算机上进行实验，屏幕分辨率为 1024 × 768，刷新率为 60 HZ。

工作记忆任务的记忆材料为彩色方块（1.32° × 1.32°），其颜色取自知觉同质的 CIELab 颜色环（以下简称色环）（Zhang & Luck, 2008，见图 1，L=70，a=20，b=38），色环由 180 种颜色组成。记忆项的颜色为从色环上选取的 4 种颜色，任意两种颜色在色环上至少相差 48°。用于记忆检测的项目颜色也取自色环，与记忆项不同的颜色与记忆项颜色相差 15°或 96°。

视觉搜索任务的材料由 8 个带有缺口的方框（0.88° × 0.88°，线粗 0.15°，以下简称方框）组成，这 8 个方框均匀分布在以屏幕中心为圆点、半径为 3.66°的虚拟圆环上。方框的缺口有上、下、左、右四种朝向，单次任务中，仅有一个方框的缺口为水平朝向，作为视觉搜索任务的目标。在单一搜索序列中，可能包含 7 个白色方框和 1 个彩色方框，彩色方框不会作为目标出现，其颜色随机取自记忆项和记忆检测项的颜色。



图 1 CIELab 颜色环(Zhang & Luck, 2008)

2.1.3 实验设计

采用 2（精度加工需求：高、低）×2（语音编码条件：抑制、促进）×3（匹配情况：基线、不匹配、匹配）被试内实验设计。参照以往研究设计（Zhang & Luck, 2015），在高精度加工需求条件下，工作记忆任务的 2 个检测项之间在色环上相差 15°；在低精度加工需求条件下，工作记忆任务的 2 个检测项之间在色环上相差 96°。语音编码条件包括促进和抑制两种条件，在抑制语音编码条件下，要求进行发音抑制任务；在促进语音编码条件下，要求对记忆项颜色进行命名任务（Souza & Skóra, 2017）。匹配情况是指记忆项和视觉搜索任务中的干扰项在颜色上的对应关系，在基线条件下，视觉搜索任务中的目标和干扰项均为白色方框；在不匹配条件下，搜索任务中彩色干扰项的颜色和记忆项颜色不一致；在匹配条件下，搜索任务中彩色干扰项的颜色和记忆项颜色一致。实验过程中记录被试完成记忆检测任务的正确率、视觉搜索任务的正确率和反应时。

2.1.4 实验程序

被试坐在距离计算机屏幕 57 cm 左右的位置，实验流程见图 2。在抑制语音编码条件下，屏幕上先呈现 4 个随机数字，要求被试在实验过程中出声复述这 4 个数字，当被试开始复述数字时，按“空格”键，在屏幕中心出现一个彩色方块（记忆项）300 ms，要求被试记住方块的颜色。之后记忆项消失呈现注视点 700 ms。随后，一半的试次，呈现视觉搜索任务，要求被试快速从呈现的 8 个方框中寻找缺口在左侧或右侧的方框，并根据方框的缺口做按键反应。若方框的缺口在左侧，则按“1”键，若方框的缺口在右侧，则按“2”键；另一半的试次，呈现记忆检测任务，在屏幕中心两侧水平 0.73°位置上呈现两个色块（1.10° × 1.10°），要求被试判断哪一个色块的颜色是记过的颜色。若与记忆项颜色一致的色块位于左侧，则按“1”键，若与记忆项颜色一致的色块位于右侧，则按“2”键。按键反应后进入下一试次。而在促进语音编码条件下，先呈现 “+” ，被试按 “空格” 键后，呈现记忆项 300ms，同时要求被试在看到颜色后，立即出声报告颜色名称。后面的程序同抑制语音编码条件。

实验共包括 48 个练习试次和 720 个正式实验试次。其中，依据精度加工需求和语音编码条件分为高精度加工需求—抑制语音编码、高精度加工需求—促进语音编码、低精度加工需求—抑制语音编码、低精度加工需求—促进语音编码 4 个 Block。每个 Block 内包含 90 个记忆检测任务试次和 90 个搜索任务试次，其中，搜索任务试次包括匹配、不匹配和基线条件各 30 个试次。Block 内试次随机呈现，Block 间进行顺序平衡。每完成 90 个试次休息 2 分钟，完成整个实验约需 60 分钟。

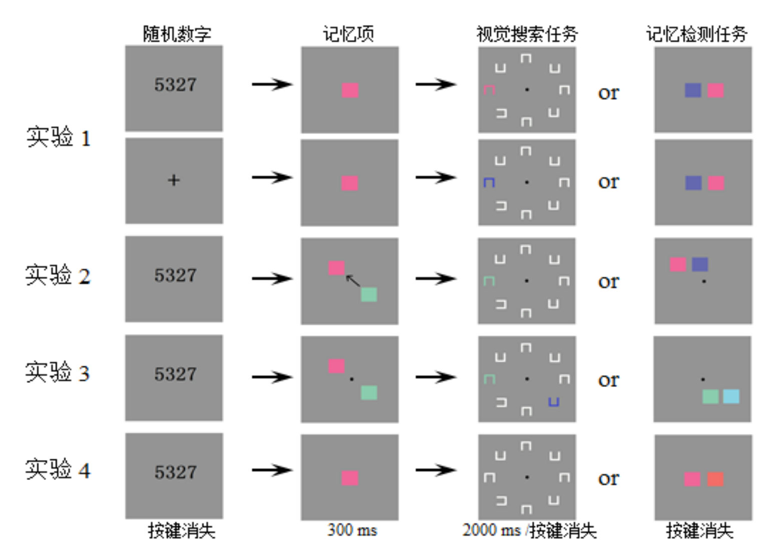


图 2 实验 1~4 单一试次流程图（第一行是实验 1 抑制语音编码条件下的实验流程图；第二行是实验 1 促进语音编码条件下的实验流程图；第三行是实验 2 的实验流程图；第四行是实验 3 的实验流程图；第五行是实验 4 的实验流程图；在单一试次中，视觉搜索任务和记忆检测任务随机呈现一种）

2.2 实验结果

2.2.1 工作记忆任务

表 1 实验 1~4 各条件下，工作记忆任务的正确率和反应时（*M*±95%CI）

		高精度加工需求		低精度加工需求	
实验	实验条件	正确率	反应时（ms）	正确率	反应时（ms）
实验 1					
	抑制语音编码	0.92±0.03		0.98±0.01	
	促进语音编码	0.94±0.02		0.99±0.01	
实验 2					
	高优先项目	0.85±0.04	699±53	0.94±0.02	611±29
	低优先项目	0.72±0.07	878±88	0.80±0.05	755±61
实验 3					
	记忆 1 个项目	0.92±0.02		0.99±0.01	
	记忆 2 个项目	0.76±0.04		0.87±0.03	
实验 4					
		0.89±0.03		0.98±0.01	

对工作记忆任务正确率（见表 1）进行 2 精度加工需求×2 语音编码条件两因素重复测量的方差分析，结果发现，精度加工需求主效应显著，F (1, 19) = 26.98，p < 0.001，$\eta_p^2 = 0.59$，高精度加工需求条件下的正确率（M = 0.93，95%CI: [0.91, 0.95]）小于低精度加工需求条件（M = 0.99，95%CI: [0.98, 0.99]）；语音编码条件主效应显著，F (1, 19) = 4.96，p = 0.038，$\eta_p^2 = 0.21$，抑制语音编码条件下的正

确率（M = 0.95，95%CI: [0.94, 0.97]）小于促进语音编码条件（M = 0.97，95%CI: [0.95, 0.98]）；两因素交互作用不显著，F (1, 19) = 0.63，p = 0.44。

2.2.2 视觉搜索任务

表 2 实验 1~4 各条件下，视觉搜索任务的正确率和反应时（M±95%CI）

实验	实验条件	匹配情况	高精度加工需求		低精度加工需求	
			正确率	反应时（ms）	正确率	反应时（ms）
实验 1						
	抑制语音编码	基线	0.98±0.02	440±91	0.99±0.01	438±110
		不匹配	0.97±0.02	475±83	0.98±0.01	470±99
		匹配	0.98±0.02	543±88	0.98±0.02	492±103
	促进语音编码	基线	0.99±0.01	418±75	0.99±0.01	430±81
		不匹配	0.98±0.01	450±66	0.98±0.01	468±76
		匹配	0.98±0.01	547±75	0.98±0.01	517±78
实验 2						
		基线	0.99±0.01	554±138	0.99±0.01	514±113
		不匹配	0.97±0.02	577±121	0.98±0.02	570±102
		高优先匹配	0.98±0.01	614±123	0.99±0.01	610±103
		低优先匹配	0.97±0.02	630±127	0.98±0.01	574±108
实验 3						
	记忆 1 个项目	基线	0.97±0.02	470±128	0.97±0.02	471±132
		匹配 0	0.98±0.02	523±119	0.95±0.02	488±109
		匹配 1	0.97±0.02	565±108	0.97±0.02	554±123
	记忆 2 个项目	基线	0.98±0.02	480±132	0.97±0.02	477±125
		匹配 0	0.98±0.01	492±111	0.98±0.01	498±116
		匹配 1	0.98±0.02	544±116	0.96±0.02	500±99
		匹配 2	0.98±0.01	593±111	0.98±0.01	541±117
实验 4						
		基线	0.96±0.03	755±51	0.98±0.01	756±48
		不匹配	0.96±0.03	747±42	0.98±0.02	755±48
		匹配	0.95±0.02	817±47	0.96±0.02	803±51

对视觉搜索任务正确率（见表 2）进行 2 精度加工需求×2 语音编码条件×3 匹配情况三因素重复测量的方差分析，结果发现，精度加工需求主效应（F (1, 19) = 1.82，p = 0.19）、语音编码条件主效应（F (1, 19) = 0.46，p = 0.51）、匹配情况主效应（F (2, 38) = 2.23，p = 0.12）、精度加工需求与语音编码条件交互作用（F (1, 19) = 3.08，p = 0.10）、精度加工需求与匹配情况交互作用（F (2, 38) = 0.62，p = 0.55）、语音编码条件与匹配情况交互作用（F (2, 38) = 0.22，p = 0.81）、三因素交互作用（F (2, 38) = 0.14，p = 0.87）均不显著。

在分析视觉搜索任务反应时时，删除视觉搜索任务反应错误的数据（占总试次数 0.89%）以及 M ±2.5SD 之外的数据（占总试次数 1.22%），剩余试次反应时见表 2。对视觉搜索任务反应时进行 2 精度加工需求×2 语音编码条件×3 匹配情况三因素重复测量的方差分析，结果发现，精度加工需求主效应不显著，F (1, 19) = 0.07，p = 0.80；语音编码条件主效应不显著，F (1, 19) = 0.08，p = 0.79；匹配情况主效应显著，F (2, 38) = 55.42，p < 0.001，η_p^2 = 0.74，匹配条件下的反应时（M = 525，95%CI: [452, 598]，单位：ms，下同）长于干不匹配条件（M = 466，95%CI: [399, 532]，p < 0.001）和基线条件（M = 431，95%CI: [358, 505]，p < 0.001），不匹配条件的反应时长于基线条件下（p < 0.001）；精度加工需求和匹配情况两因素交互作用显著，F (2, 38) = 6.63，p = 0.003，η_p^2 = 0.26；精度加工需求与语音编

码条件交互作用（F (1, 19) = 0.25，p = 0.62）、语音编码条件与匹配情况交互作用（F (2, 38) = 2.74，p = 0.08）、三因素交互作用（F (2, 38) = 0.09，p = 0.92）均不显著。

用匹配条件减去不匹配条件下的搜索反应时作为基于工作记忆的注意捕获效应量，各条件下基于工作记忆的注意捕获效应量见图 3A。对基于工作记忆的注意捕获效应量进行 2 精度加工需求×2 语音编码条件两因素重复测量的方差分析，结果发现，精度加工需求主效应显著，F (1, 19) = 9.20，p = 0.007，η_p^2 = 0.33，高精度加工需求条件下基于工作记忆的注意捕获效应量（M = 83，95%CI: [54, 111]，单位：ms，下同）大于低精度加工需求条件（M = 36，95%CI: [11, 60]）；语音编码条件主效应显著，F (1, 19) = 4.78，p = 0.041，η_p^2 = 0.20，抑制语音编码条件下基于工作记忆的注意捕获效应量（M = 45，95%CI: [29, 61]）小于促进语音编码条件（M = 73，95%CI: [42, 105] ）；两因素交互作用不显著，F (1, 19) = 0.02，p = 0.89。

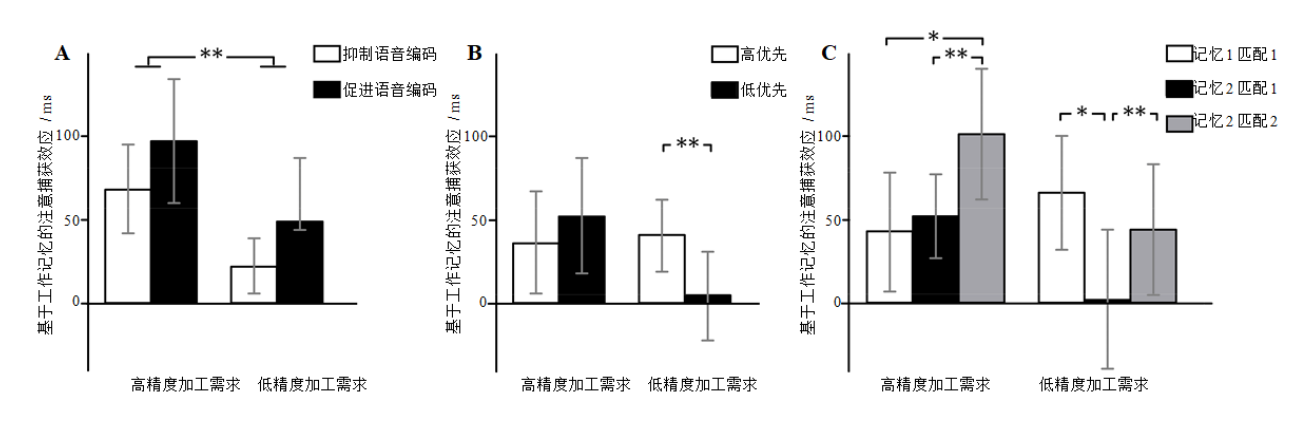


图 3 实验 1~3 各条件下基于工作记忆的注意捕获效应量（其中，图 A 是实验 1 的结果；图 B 是实验 2 的结果；图 C 是实验 3 的结果；竖线表示 95%置信区间，* p < 0.05，** p < 0.01）

2.3 讨论

在实验 1 中操纵工作记忆表征精度加工需求，探讨单项目工作记忆表征对注意引导的影响，结果发现，在记忆任务下，高精度加工需求条件下的记忆正确率低于低精度加工需求条件，表明实验中对工作记忆表征精度加工需求操纵有效。在工作记忆任务中，提高工作记忆表征的精度加工需求，增加了工作记忆任务难度，需要消耗更多的工作记忆资源（Bays & Husain, 2008），导致工作记忆成绩下降。结果还发现，抑制语音编码条件下的正确率小于促进语音编码条件，与以往研究一致（Souza & Skóra, 2017），表明对记忆项进行语音编码有利于提高工作记忆成绩。

对视觉搜索任务结果分析发现，高精度加工需求条件下，基于工作记忆的注意捕获效应量大于低精度加工需求条件。并且，精度加工需求和语音编码条件两因素交互作用不显著，说明语音编码强度的不同没有调节高低精度加工需求条件间注意捕获效应的差异，即实验中高低精度加工需求条件下基于工作记忆的注意捕获效应量的差异，并非是对记忆项语音编码强度的差异造成的。与低精度加工需

求条件相比，在高精度加工需求条件下，工作记忆表征获取的工作记忆资源更多，对记忆项进行更多的复述加工，可能促进了枕叶的激活（Zhao et al., 2020），这有利于与记忆项匹配的干扰项获得竞争优势，使得匹配干扰项捕获更多的注意。另外，由于事先知道记忆项可能与干扰项匹配，被试可以自上而下的控制记忆项用于干扰抑制（Dube et al., 2016），在低精度加工需求条件下，认知资源充足，当呈现搜索任务时，被试能够及时调整资源依据工作记忆表征抑制匹配干扰项的加工，匹配干扰项产生较少的基于工作记忆的注意捕获；而在高精度加工需求条件下，认知资源消耗较多，被试用于依据工作记忆表征对匹配干扰项进行抑制的资源减少，匹配干扰项捕获注意增加。

以往研究发现，只有处于高激活状态的工作记忆表征能够引导注意，而处于低激活状态的工作记忆表征不能引导注意（van Moorselaar et al., 2014）。在实验 1 中仅呈现 1 个记忆项，在高精度条件下，工作记忆表征的加工需要更多资源，这可能使工作记忆表征处在更为激活的状态，因此，工作记忆表征精度加工需求对注意引导的影响可能是由于改变了工作记忆表征的激活状态，我们设计实验 2 对此加以验证。

3 实验 2 工作记忆的表征精度加工需求与表征激活状态对注意引导的影响

采用线索化范式，操纵工作记忆表征激活状态，探讨工作记忆的表征精度加工需求与表征激活状态对注意引导的影响。

3.1 方法

3.1.1 被试

采用 G*Power 3.1 软件，设置统计检验力为 0.80，α 水平为 0.05，效应量为中等水平（f = 0.25）（Cohen, 1992），计算被试样本量为 16。选取某大学 16 名在校大学生参与实验，其中男生 5 名，年龄 19.38±0.89 岁。所有被试视力或矫正视力正常，无色盲或色弱情况，无精神病史，均未参加过类似实验，实验后给与报酬。

3.1.2 仪器和材料

记忆项为 2 个，且在记忆项呈现时，增加了箭头线索（0.1°×1.9°）。其余同实验 1。

3.1.3 实验设计

采用 2（精度加工需求：高、低）×4（匹配情况：基线、不匹配、高优先匹配、低优先匹配）被试内实验设计。精度加工需求同实验 1。实验中线索指向项目为高优先项目，非线索指向项目为低优先项目。匹配情况是指记忆项和视觉搜索任务中的干扰项在颜色上的对应关系，在基线条件下，视觉搜索任务中的目标和干扰项均为白色方框；在不匹配条件下，搜索任务中干扰项的颜色和两个记忆项的颜色均不一致；在高优先匹配条件下，搜索任务中干扰项的颜色与记忆项中高优先项目的颜色一致；在低优先匹配条件下，搜索任务中干扰项的颜色与记忆项中低优先项目的颜色一致。实验过程中

记录被试完成记忆检测任务和视觉搜索任务的反应时和正确率。

3.1.4 实验程序

实验单一试次流程见图 2。在记忆任务呈现时，出现两个记忆项，随机呈现于以屏幕中心为圆点、半径 2.34°的虚拟圆环上，两记忆项在圆环上相距 180°。同时在屏幕中心呈现一个箭头线索，箭头指向某一记忆项，被指向的记忆项有 80%的可能被记忆检测。在记忆检测阶段，两个检测项出现在相应记忆项位置两侧 0.73°。其余同实验 1。

实验共包括 32 个练习试次和 640 个正式实验试次。其中，依据高、低精度加工需求条件分为 2 个 Block，每个 Block 内包括 160 个记忆检测任务试次和 160 个搜索任务试次，其中搜索任务试次包括基线、不匹配、高优先匹配和低优先匹配条件各 40 个试次，Block 内试次随机呈现，Block 间进行顺序平衡。每完成 80 个试次休息 2 分钟，完成整个实验约需 60 分钟。

3.2 实验结果

3.2.1 工作记忆任务

对工作记忆任务的正确率（见表 1）进行 2（精度加工需求：高、低）×2（记忆项优先情况：高、低）两因素重复测量的方差分析，结果发现，精度加工需求主效应显著，F (1, 15) = 15.68，p = 0.001，η_p^2 = 0.51，高精度加工需求条件下的正确率（M = 0.79，95%CI: [0.74, 0.83]）低于低精度加工需求条件（M = 0.87，95%CI: [0.85, 0.89]）；记忆项优先情况主效应显著，F (1, 15) = 25.64，p < 0.001，η_p^2 = 0.63，记忆高优先项目的正确率（M = 0.90，95%CI: [0.87, 0.92]）高于记忆低优先项目（M = 0.76，95%CI: [0.71, 0.81]）；两因素交互作用不显著，F (1, 15) = 0.06，p = 0.80。

对工作记忆任务的反应时（见表 1）进行 2（精度加工需求：高、低）×2（记忆项优先情况：高、低）两因素重复测量的方差分析，结果发现，精度加工需求主效应显著，F (1, 15) = 23.96，p < 0.001，η_p^2 = 0.62，高精度加工需求条件下的反应时（M = 789，95%CI: [731, 846]，单位：ms，下同）长于低精度加工需求条件（M = 683，95%CI: [642, 724]）；记忆项优先情况主效应显著，F (1, 15) = 28.83，p < 0.001，η_p^2 = 0.66，对高优先项目的反应时（M = 655，95%CI: [619, 691]）快于低优先项目（M = 817，95%CI: [749, 884]）；两因素交互作用不显著，F (1, 15) = 1.07，p = 0.32。

3.2.2 视觉搜索任务

对视觉搜索任务的正确率（见表 2）进行 2 精度加工需求×4 匹配情况两因素重复测量的方差分析，结果发现，精度加工需求主效应不显著，F (1, 15) = 0.70，p = 0.42；匹配情况主效应显著，F (3, 45) = 4.71，p = 0.006，η_p^2 = 0.24，高优先匹配（M = 0.98，95%CI: [0.97, 0.99]）与低优先匹配（M = 0.97，95%CI: [0.96, 0.99]）、高优先匹配与不匹配（M = 0.98，95%CI: [0.96, 0.99]）、低优先匹配与不匹配条件下搜索任务的正确率没有差异（p_1 = 0.12，p_2 = 0.15，p_3 = 0.90），均小于基线条件（M = 0.99，95%CI: [0.98, 0.998]，p_1 = 0.022，p_2 = 0.011，p_3 = 0.002）；两因素交互作用不显著，F (3, 45) =

0.84，$p = 0.48$。

在分析视觉搜索任务反应时时，删除视觉搜索任务反应错误的数据（占总试次数 0.73%）以及 $M \pm 2.5SD$ 之外的数据（占总试次数 0.90%），剩余试次反应时见表 2。对视觉搜索任务的反应时进行 2 精度加工需求×4 匹配情况两因素重复测量的方差分析，结果发现，精度加工需求主效应不显著，$F(1, 15) = 0.42$，$p = 0.53$；匹配情况主效应显著，$F(3, 45) = 18.41$，$p < 0.001$，$\eta_p^2 = 0.55$，高优先匹配条件的反应时（$M = 612$，95%CI: [508, 717]，单位：ms，下同）长于不匹配条件（$M = 574$，95%CI: [470, 678]，$p = 0.002$）和基线条件（$M = 534$，95%CI: [416, 652]，$p < 0.001$），低优先匹配条件的反应时（$M = 602$，95%CI: [495, 709]）长于不匹配条件和基线条件（$p_1 = 0.009$，$p_2 < 0.001$），不匹配条件的反应时长于基线条件，$p = 0.004$，高、低优先匹配条件的反应时没有差异，$p = 0.29$；两因素交互作用边缘显著，$F(3, 45) = 2.69$，$p = 0.058$，$\eta_p^2 = 0.15$。

对基于工作记忆的注意捕获效应量（计算方法同实验 1）进行 2（精度加工需求：高，低）×2（匹配情况：高优先匹配、低优先匹配）两因素重复测量的方差分析。结果发现，精度加工需求（$F(1, 15) = 3.08$，$p = 0.10$）和匹配情况（$F(1, 15) = 1.60$，$p = 0.23$）主效应均不显著；两因素交互作用显著，$F(1, 15) = 10.24$，$p = 0.006$，$\eta_p^2 = 0.41$。简单效应分析发现，在高精度加工需求条件下，高优先匹配条件（$M = 36$，95%CI: [6, 67]，单位：ms，下同）和低优先匹配条件（$M = 52$，95%CI: [18, 87]）下基于工作记忆的注意捕获效应量没有差异（$F(1, 15) = 1.65$，$p = 0.22$）；在低精度加工需求条件下，高优先匹配条件下基于工作记忆的注意捕获效应量（$M = 41$，95%CI: [19, 62]）大于低优先匹配条件（$M = 5$，95%CI: [-22, 31]，$F(1, 15) = 11.97$，$p = 0.003$），见图 3B。

3.3 讨论

在实验 1 的基础上，在实验 2 中增加线索，提示被试其中一个工作记忆项目以更高的概率被检测，探讨工作记忆的表征精度加工需求与表征激活状态对注意引导的影响。对工作记忆任务的结果分析发现，在高精度加工需求条件下的记忆正确率低于低精度加工需求条件，与实验 1 的结果一致。以更高的概率被检测的项目作为高优先项目，处于高激活的工作记忆表征状态，对不同激活状态项目的工作记忆成绩分析发现，对高激活项目的记忆正确率高于低激活项目，且对高激活项目检测反应时快于低激活项目，表明在实验中对线索的操纵有效。

对视觉搜索任务结果分析发现，在低精度加工需求条件下，与高激活项目匹配的干扰项捕获注意的效应量大于与低激活项目匹配的干扰项，这与 van Moorselaar 等人（2014）采用线索化范式和变化觉察任务，探讨表征状态对注意引导的影响，所得结果一致；然而，在高精度加工需求条件下，高、低激活项目匹配的干扰项捕获注意的效应量没有差异，这与 van Moorselaar 等人（2014）的结果不一致，而与 Dube 和 Al-Aidroos（2019）采用线索化范式和连续报告任务，探讨工作记忆表征优先性对注意引导的影响，所得结果一致。有研究者认为（Zhang & Luck, 2011），与变化觉察任务相比，连续报

告任务对工作记忆表征精度的加工要求更高，这说明以往研究中探讨工作记忆表征的激活状态对注意引导的影响，得到不一致结果，可能与工作记忆表征精度加工需求没有得到控制有关。提高工作记忆表征的精度加工需求，会增加工作记忆资源的消耗（Bays & Husain, 2008; Machizawa et al., 2012），用于认知控制的资源减少，因此，与不同激活状态记忆项匹配的干扰项均会捕获注意。在实验 2 中发现，仅在低精度加工需求条件下，工作记忆表征激活状态影响注意的引导，这是否与能够引导注意的工作记忆表征数量有关？在实验 3 中，增加搜索任务中突显干扰项的数量，通过两个工作记忆表征同时与干扰项发生匹配，对上述问题加以探讨。

4 实验 3 多项目工作记忆表征精度加工需求对注意引导的影响

采用实验 1 范式，操纵工作记忆表征数量和表征精度加工需求，探讨多项目工作记忆表征对注意引导的影响。

4.1 方法

4.1.1 被试

采用 G*Power 3.1 软件，设置统计检验力为 0.80，α 水平为 0.05，效应量为中等水平（$f = 0.25$）（Cohen, 1992），计算被试样本量为 12。选取某大学 16 名在校大学生参与实验，其中男生 5 名，年龄 19.38±0.89 岁。所有被试视力或矫正视力正常，无色盲或色弱情况，无精神病史，均未参加过类似实验，实验后给与报酬。

4.1.2 仪器和材料

记忆项为 2 个，搜索任务中可能呈现 2 个彩色方框。其余同实验 1。

4.1.3 实验设计

实验采用 2（精度加工需求：高、低）×2（记忆项数量：1、2）×4（匹配情况：基线、匹配 0、匹配 1、匹配 2）被试内实验设计。精度加工需求同实验 1。记忆项数量是指在工作记忆任务中需要记忆的色块数量。匹配情况是指记忆项和视觉搜索任务中的干扰项在颜色上的匹配关系，在基线条件下，视觉搜索任务中的目标和干扰项均为白色方框；在匹配 0 条件下，搜索项中存在 2 个彩色干扰项，干扰项颜色与记忆项颜色均不一致；在匹配 1 条件下，搜索项中 1 个干扰项颜色与记忆项颜色一致；在匹配 2 条件下，搜索项中 2 个干扰项颜色与记忆项颜色一致。实验过程中记录被试完成记忆检测任务的正确率、视觉搜索任务的反应时和正确率。

4.1.4 实验程序

单一试次流程见图 2。在记忆任务呈现时，出现一个或两个记忆项，随机呈现于以屏幕中心为圆点、半径 2.34°的虚拟圆环上，若呈现两个记忆项，则两记忆项在圆环上相距 180° 。在记忆检测阶段，两个检测项出现在相应记忆项位置两侧 0.73°。其余同实验 1。

实验共包括 28 个练习试次和 840 个正式实验试次。其中，依据高、低精度加工需求条件分为 2 个 Block，每个 Block 内包括 210 个记忆检测任务试次和 210 个搜索任务试次，其中搜索任务试次包括记忆 1 基线、记忆 1 匹配 0、记忆 1 匹配 1、记忆 2 基线、记忆 2 匹配 0、记忆 2 匹配 1、记忆 2 匹配 2 各 30 个试次，Block 内各试次随机呈现，Block 间进行顺序平衡。每完成 84 个试次休息 2 分钟，完成整个实验约需 70 分钟。

4.2 实验结果

4.2.1 工作记忆任务

对工作记忆任务的正确率（见表 1）进行 2 精度加工需求×2 记忆项数量两因素重复测量的方差分析，结果发现，精度加工需求主效应显著，F (1, 15) = 71.13，p < 0.001，η_p^2 = 0.83，高精度加工需求条件下的正确率（M = 0.84，95%CI: [0.82, 0.87]）低于低精度加工需求条件（M = 0.93，95%CI: [0.91, 0.95]）；记忆项数量主效应显著，F (1, 15) = 77.23，p < 0.001，η_p^2 = 0.84，记忆 1 个项目的正确率（M = 0.95，95%CI: [0.94, 0.97]）高于记忆 2 个项目（M = 0.81，95%CI: [0.78, 0.85]）；两因素交互作用显著，F (1, 15) = 12.52，p = 0.003，η_p^2 = 0.46。简单效应分析发现，高精度加工需求条件下，记忆 1 个项目的正确率高于记忆 2 个项目，F (1, 15) = 70.56，p < 0.001；低精度加工需求条件下，记忆 1 个项目的正确率高于记忆 2 个项目，F (1, 15) = 58.85，p < 0.001。

4.2.2 视觉搜索任务

对视觉搜索任务的正确率（见表 2）进行 2（精度加工需求：高、低）×7（记忆项数量-匹配情况：记忆 1 基线、记忆 1 匹配 0、记忆 1 匹配 1、记忆 2 基线、记忆 2 匹配 0、记忆 2 匹配 1、记忆 2 匹配 2）两因素重复测量的方差分析，结果发现，精度加工需求（F (1, 15) = 1.96，p = 0.18）和记忆项数量-匹配情况主效应（F (6, 90) = 1.04，p = 0.41）、两因素交互作用（F (6, 90) = 1.08，p = 0.38）均不显著。

在分析视觉搜索任务反应时时，删除视觉搜索任务反应错误的数据（占总试次数 0.78%）以及 $M \pm 2.5SD$ 之外的数据（占总试次数 1.06%），剩余试次反应时见表 2。对视觉搜索任务的反应时进行 2 精度加工需求×7 记忆项数量-匹配情况两因素重复测量的方差分析，结果发现，精度加工需求主效应不显著，F (1, 15) = 0.22，p = 0.64；记忆项数量-匹配情况主效应显著，F (6, 90) = 13.10，p < 0.001，η_p^2 = 0.47；精度加工需求和记忆项数量-匹配情况两因素交互作用显著，F (6, 90) = 2.55，p = 0.025，η_p^2 = 0.15。

对基于工作记忆的注意捕获效应量（计算方法同实验 1）进行 2（精度加工需求：高、低）×3（记忆项数量-匹配情况：记忆 1 匹配 1、记忆 2 匹配 1、记忆 2 匹配 2）两因素重复测量的方差分析。结果发现，精度加工需求主效应边缘显著，F (1, 15) = 3.92，p = 0.067，η_p^2 = 0.21，高精度加工需求条件下基于工作记忆的注意捕获效应量（M = 65，95%CI: [41, 89]，单位：ms，下同）大于低精度加工

需求条件（M = 37，95%CI: [11, 63]）；记忆项数量-匹配情况主效应显著，F (2, 30) = 3.74，p = 0.035，η_p^2 = 0.20，记忆 2 匹配 2 条件下基于工作记忆的注意捕获效应量（M = 72，95%CI: [43, 102]）大于记忆 2 匹配 1（M = 27，95%CI: [-1, 55]，p < 0.001），记忆 1 匹配 1 条件（M = 54，95%CI: [26, 82]）与记忆 2 匹配 1、记忆 2 匹配 2 条件下基于工作记忆的注意捕获效应量没有差异，p_1 = 0.19，p_2 = 0.39；两因素交互作用显著，F (2, 30) = 5.54，p = 0.009，η_p^2 = 0.27。简单效应分析发现，在高精度加工需求条件下，记忆项数量-匹配情况差异显著，F (2, 30) = 5.17，p = 0.012，记忆 2 匹配 2 条件下基于工作记忆的注意捕获效应量（M = 101，95%CI: [62, 140]）大于记忆 2 匹配 1（M = 52，95%CI: [27, 77]，p = 0.003）和记忆 1 匹配 1 条件（M = 43，95%CI: [7, 78]，p = 0.020），记忆 2 匹配 1 和记忆 1 匹配 1 条件下基于工作记忆的注意捕获效应量没有差异，p = 0.67；在低精度加工需求条件下，记忆项数量-匹配情况差异显著，F (2, 30) = 3.93，p = 0.031，记忆 2 匹配 2（M = 44，95%CI: [5, 83]）和记忆 1 匹配 1 条件（M = 66，95%CI: [32, 100]）下基于工作记忆的注意捕获效应量大于记忆 2 匹配 1 条件（M = 2，95%CI: [-39, 44]，p_1 = 0.007，p_2 = 0.031），记忆 2 匹配 2 和记忆 1 匹配 1 条件基于工作记忆的注意捕获效应量没有差异，p = 0.42，见图 3C。

4.3 讨论

在实验 3 中针对在不同精度加工需求条件下工作记忆表征的数量对引导注意的影响进行了探讨，对工作记忆任务的结果分析发现，在高精度加工需求条件下的工作记忆正确率低于低精度加工需求条件，与实验 1 的结果一致。对视觉搜索任务的结果分析发现，在低精度加工需求条件下，记忆 1 匹配 1 和记忆 2 匹配 2 条件下基于工作记忆的注意捕获效应量没有差异，均大于记忆 2 匹配 1 条件，符合工作记忆表征引导注意的单模板假设预期，即低精度加工需求条件下，只有一个工作记忆表征引导注意，因此，实验 2 低精度加工需求条件下，当工作记忆中存储多个表征时，只有处于高激活状态的这一工作记忆表征能引导注意。在高精度加工需求条件下，记忆 2 匹配 2 条件下基于工作记忆的注意捕获效应大于记忆 2 匹配 1 和记忆 1 匹配 1 条件，符合工作记忆表征引导注意的多模板假设预期（Fan et al, 2019; Hollingworth & Beck, 2016），即高精度加工需求条件下，可以有多个工作记忆表征引导注意，因此，实验 2 高精度加工需求条件下，多个工作记忆表征对注意的引导不受表征激活状态的影响。

工作记忆表征精度加工需求影响注意引导的机制是什么？在实验 4 中采用 ERP 技术，比较不同表征精度加工需求条件下工作记忆任务和随后的搜索任务中的认知资源投入情况，以进一步探讨工作记忆表征精度加工需求影响注意捕获的机制。

5 实验 4 工作记忆表征精度加工需求影响注意引导的机制——来自 ERP 的证据

采用反映工作记忆存储过程资源投入的负慢波（negative slow wave, NSW）（Kursawe & Zimmer, 2015），反映工作记忆存储过程自上而下控制的晚正成分（late positive component, LPC）（黎翠红 等, 2015; Gao et al., 2011），反映冲突监测和认知控制的 N2 以及反映注意资源投入的 N2pc 等 ERP 成分，探讨工作记忆表征精度加工需求影响注意捕获的机制。

5.1 方法

5.1.1 被试

根据以往研究（李寿欣 等, 2019）中 N2 波幅在工作记忆负载和干扰一致性交互作用的效果量（$\eta_p^2 = 0.22$），采用 G*Power 3.1 软件，设置统计检验力为 0.80，α 水平为 0.05，计算被试样本量为 5。选取某大学 17 名在校大学生，所有被试视力或矫正视力正常，无色盲或色弱情况，无精神病史，均未参加过类似实验，实验后给与报酬。数据分析中 1 名被试因头动伪迹较多、数据不完整等原因被剔除，最终剩余被试 16 名，其中男生 6 名，年龄 19.44±1.59 岁。

5.1.2 仪器和材料

同实验 1。

5.1.3 实验设计

实验采用 2（精度加工需求：高、低）×3（匹配情况：基线、不匹配、匹配）被试内实验设计。记录被试完成工作记忆任务的正确率，视觉搜索任务的反应时和正确率，以及完成两个任务时的脑电数据。

5.1.4 实验程序

单一试次流程图见图 2。将实验 1 的数字出声复述任务改为数字默念任务（Luria et al., 2010），即要求被试在完成一个试次的任务过程心中一直默念呈现的数字；将视觉搜索任务改为呈现 2000 ms，按键不消失，以保证记录到的 ERP 成分不受视觉刺激消失的影响。由于脑电分析成分包括 N2pc 这一单侧化成分，视觉搜索任务的目标项仅出现在屏幕左右两侧，并且目标项与干扰项不会在屏幕同侧出现。另外，为了保证被试在实验过程中左右手按键反应平衡，实验按键设为“F”、“J”键。其他同实验 1。

实验共包括 24 个练习试次和 960 个正式实验试次。其中，高、低精度加工需求条件分为 2 个 Block，每个 Block 内包括 240 个记忆检测任务试次和 240 个搜索任务试次，其中搜索任务试次包括基线、不匹配和匹配条件各 80 个试次，Block 内试次随机呈现，Block 间进行顺序平衡。每完成 96 个试次休息 2 分钟，完成整个实验约需 80 分钟。

5.1.5 ERP 数据采集与分析

脑电数据采集使用美国 NeuroScan 公司的 CURRY 7 脑电设备，按 10-20 国际系统扩展的 64 导电极帽记录脑电。以左眼眶额上、下部的两电极记录垂直眼电(VEOG)，以两眼外侧 1.5 cm 处的两电极

记录水平眼电(HEOG)。在数据记录时，所有电极以左侧乳突作为参考，以右侧乳突处电极为记录电极，离线分析时以双侧乳突的平均作为参考。所有电极与头皮间的电阻均降于 10 KΩ 以下。在线滤波低通值为 100 Hz，采用 DC 采样，采样频率为 1000 Hz，进行连续采样。采用 Scan 4.5 脑电数据分析系统进行离线数据分析。对采集的数据进行 DC 校正，运用伪迹校正正相关法控制眨眼和眼动数据，采用低通 30 Hz 进行离线滤波。

NSW 分析 以记忆项出现前 200 ms 的平均波幅作为基线进行校正，分析时间窗口为记忆项呈现后 600~1000 ms。参照以往的研究（Yang et al., 2015），主要分析顶枕区的电极点（PO7、PO8、Oz）。在分析数据时，剔除振幅在±100 μV 以外的试次以及错误反应的试次，高、低精度加工需求条件下剔除率分别为 46.77%和 36.64%，有效叠加试次数分别为 256 和 304，处理后的 NSW 波形图见图 4。

LPC 分析 以记忆项出现前 200 ms 的平均波幅作为基线进行校正，分析时间窗口为记忆项呈现后 450~1000 ms。参照以往的研究（Li et al., 2010），主要分析前额区的电极点（F3、Fz 、F4、FC3、FCZ、FC4）。在分析数据时，剔除振幅在±100 μV 以外的试次以及错误反应的试次，高、低精度加工需求条件下剔除率分别为 46.77%和 36.64%，有效叠加试次数分别为 256 和 304。处理后的 LPC 波形图见图 5。

N2 分析 以搜索序列呈现前 100 ms 的平均波幅作为基线进行校正，以搜索序列呈现后 250~350 ms 内每个被试在不同条件下负向成分峰值出现的前后 20 ms 作为 N2 成分分析的时间窗口。参照以往的研究（李寿欣 等, 2019），主要分析前额—额中区的电极点（Fz、FCz、Cz）。分析数据时，剔除振幅在±100 μV 以外与错误反应的试次，在高精度加工需求条件下，基线、不匹配和匹配条件下的剔除率分别为 23.59%、20.23%和 25.94%，有效叠加试次数分别为 61、64 和 59；在低精度加工需求条件下，基线、不匹配和匹配条件下的剔除率分别为 20.78%、21.64%和 22.81%，有效叠加试次数分别为 63、63 和 62。处理后的 N2 波形图见图 6A 和图 6B。

N2pc 分析 以目标项出现对侧的电极点数据减去目标项出现同侧的电极点数据，然后，对数据进行叠加平均。以搜索序列呈现前 100 ms 的平均波幅作为基线进行校正，分析时间窗口为搜索序列呈现后 260~360 ms。参照以往的研究（Berggren & Eimer, 2018），主要分析 PO7、PO8 两个电极点。在分析数据时，剔除振幅在±100 μV 以外的试次以及错误反应的试次，在高精度加工需求条件下，基线、不匹配和匹配条件下的剔除率分别为 20.70%、20.16%和 19.45%，有效叠加试次数分别为 63、64 和 64；在低精度加工需求条件下，基线、不匹配和匹配条件下的剔除率分别为 14.69%、17.97%和 17.79%，有效叠加试次数分别为 68、66 和 66。处理后的 N2pc 波形图见图 7A 和图 7B。

5.2 实验结果

5.2.1 行为数据结果

对高、低精度加工需求条件下的工作记忆任务正确率（见表 1）进行配对样本 *t* 检验，结果发现，

高精度加工需求条件下的正确率（M = 0.89，95%CI: [0.86, 0.93]）低于低精度加工需求条件（M = 0.98，95%CI: [0.97, 0.99]），t (15) = 7.89，$p < 0.001$，Cohen's d = 3.41。

对视觉搜索任务正确率（见表 2）进行 2 精度加工需求×3 匹配情况两因素重复测量的方差分析，结果发现，精度加工需求主效应显著，F (1, 15) = 9.19，p = 0.008，$\eta_p^2 = 0.38$，高精度加工需求条件下的搜索正确率（M = 0.95，95%CI: [0.93, 0.98]）低于低精度加工需求条件（M = 0.97，95%CI: [0.96, 0.99]）；匹配情况主效应显著，F (2, 30) = 7.39，p = 0.002，$\eta_p^2 = 0.33$，匹配条件下的搜索正确率（M = 0.95，95%CI: [0.93, 0.97]）低于不匹配条件（M = 0.97，95%CI: [0.95, 0.99]，p = 0.011）和基线条件（M = 0.97，95%CI: [0.95, 0.99]，p = 0.003），不匹配条件和基线条件下的搜索正确率没有差异，p = 0.77；两因素交互作用不显著，F (2, 30) = 1.96，p = 0.16。

在分析视觉搜索任务反应时时，删除视觉搜索任务反应错误的数据（占总试次数 1.79%）以及 M ±2.5*SD* 之外的数据（占总试次数 1.24%），剩余试次反应时见表 2。对视觉搜索任务反应时进行 2 精度加工需求×3 匹配情况两因素重复测量的方差分析，结果发现，精度加工需求主效应不显著，F (1, 15) = 0.002，p = 0.97；匹配情况主效应显著，F (2, 30) = 25.87，$p < 0.001$，$\eta_p^2 = 0.63$，匹配条件下的搜索任务反应时（M = 810，95%CI: [774, 846]，单位：ms，下同）长于不匹配条件（M = 751，95%CI: [718, 785]，$p < 0.001$）和基线条件（M = 756，95%CI: [719, 792]，$p < 0.001$），不匹配条件和基线条件下的搜索任务正确率没有差异，p = 0.62；两因素交互作用不显著，F (2, 30) = 1.98，p = 0.16。

对高、低精度加工需求条件下基于工作记忆的注意捕获效应量进行配对样本 t 检验，结果发现，高精度加工需求条件下基于工作记忆的注意捕获效应量（M = 70，95%CI: [55, 85]，单位：ms，下同）大于低精度加工需求条件（M = 47，95%CI: [31, 63]），t (15) = 2.24，p = 0.041，Cohen's d = 0.56。

5.2.2 ERP 数据结果

NSW 对记忆项呈现后 PO7、PO8、OZ 三个电极点上的 NSW 波幅进行配对样本 t 检验，结果发现，高精度加工需求条件下记忆项诱发的 NSW（M = -0.97，95%CI: [-1.78, -0.16]，单位：μV，下同）大于低精度加工需求条件（M = -0.25，95%CI: [-1.06, 0.56]），t（15）= 2.23，p = 0.042，Cohen's d = 0.56。

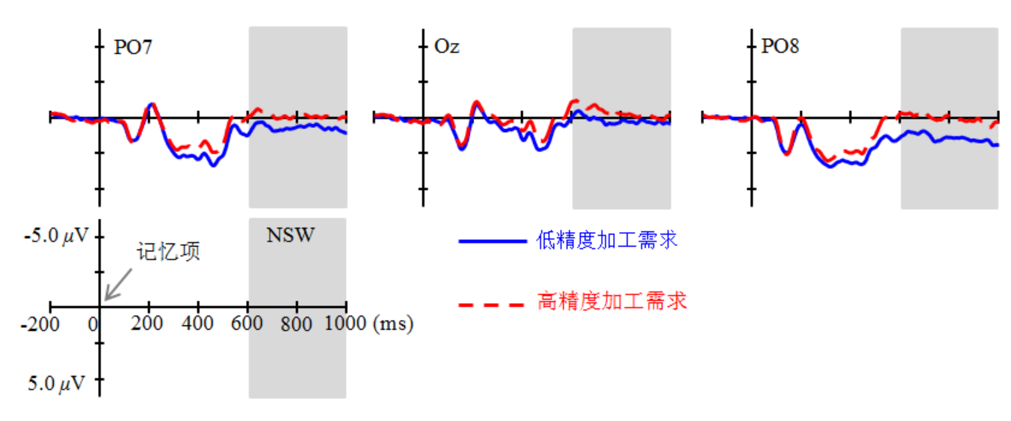


图 4 实验 4 高低精度条件下记忆项诱发的 NSW 成分（灰色区域表示 600~1000 ms 时间窗口）

LPC 对记忆项呈现后 F3、Fz 、F4、FC3、FCZ、FC4 六个电极点上的 LPC 波幅进行配对样本 *t* 检验，结果发现，高精度加工需求条件下记忆项诱发的 LPC（*M* = -0.92，95%CI: [-1.65, -0.18]）大于低精度加工需求条件（*M* = -1.79，95%CI: [-2.86, -0.73]），*t*（15）= 2.16，*p* = 0.048，Cohen's d = 0.56。

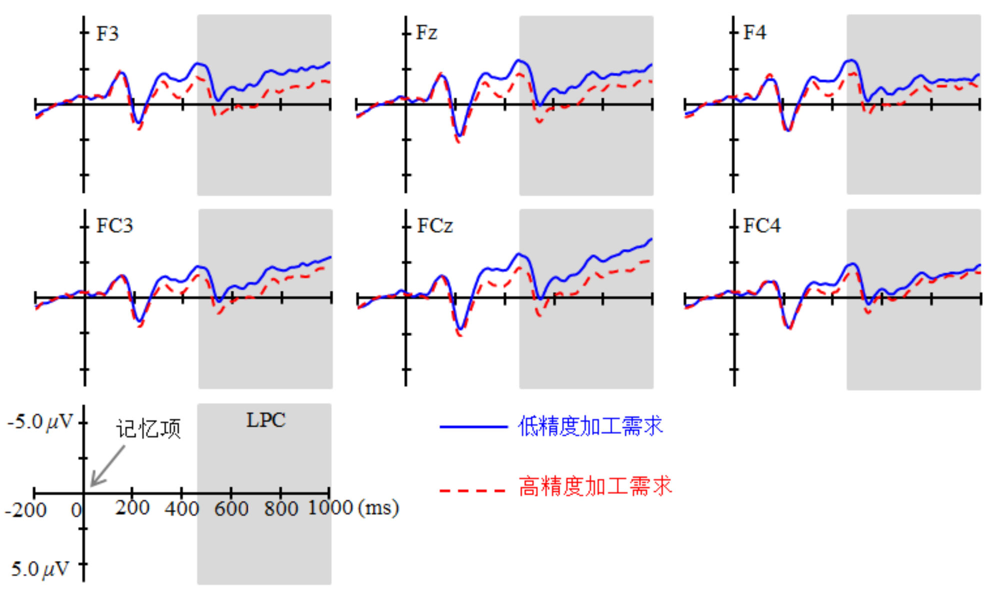


图 5 实验 4 高低精度条件下记忆项诱发的 LPC 成分（灰色区域表示 450~1000 ms 时间窗口）

N2 对搜索项呈现后 Fz、FCz、Cz 三个电极点上的 N2 波幅进行 2 度加工需求×3 匹配情况两因素重复测量的方差分析，结果发现，精度加工需求主效应不显著，*F* (1, 15) = 0.57，*p* = 0.46；记忆项匹配情况主效应不显著，*F* (2, 30) = 0.52，*p* = 0.60；两因素交互作用显著，*F* (2, 30) = 6.32，*p* = 0.005，η_p^2 = 0.30。简单效应分析发现，在高精度加工需求条件下，匹配情况差异显著，*F* (2, 30) = 4.44，*p* = 0.020，匹配条件下的 N2（*M* = 1.87，95%CI: [-0.55, 4.29]）大于不匹配条件（*M* = 2.59，95%CI: [0.01, 5.17]，*p* = 0.002）和基线条件（*M* = 2.58，95%CI: [0.21, 4.95]，*p* = 0.032），不匹配条件和基线条件的 N2 没有差异（*p* = 0.97）；在低精度加工需求条件下，匹配情况差异不显著，*F* (2, 30) = 1.39，*p* = 0.26。见图 6D。

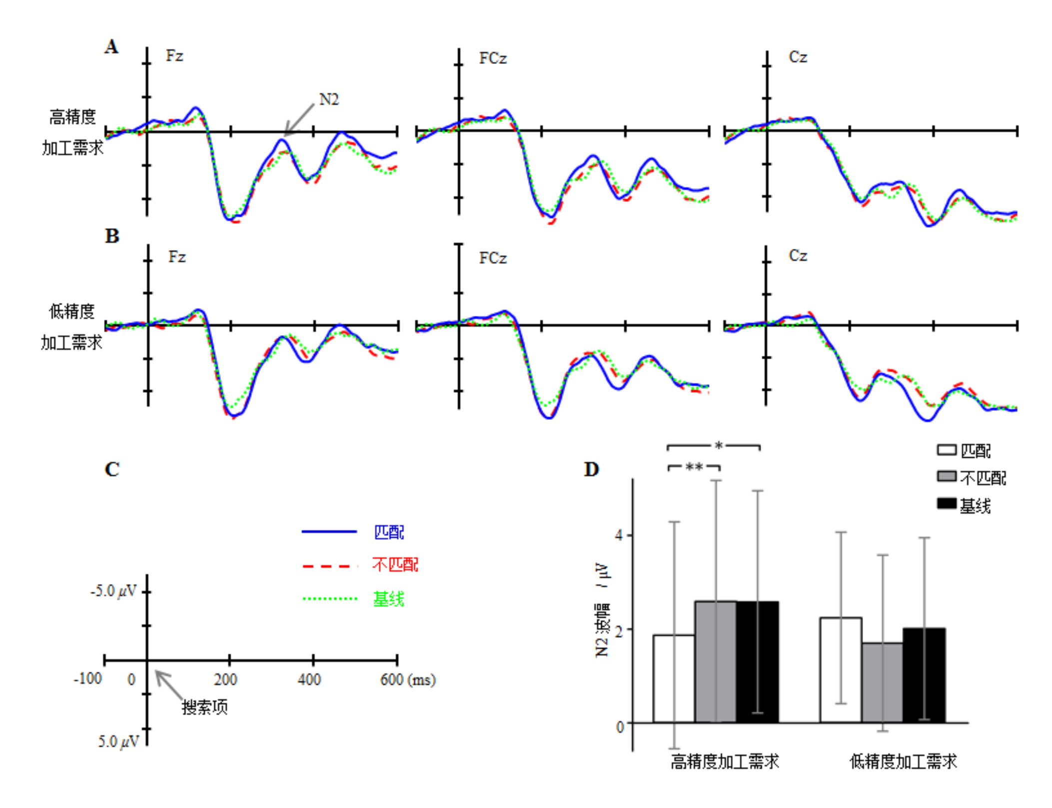


图 6 实验 4 不同条件下，搜索项诱发的 N2 及其波幅值（其中，图 A 是高精度加工需求条件下 Fz、FCz 和 Cz 电极点的 N2 波形图；图 B 是低精度加工需求条件下 Fz、FCz 和 Cz 电极点的 N2 波形图；图 C 是 N2 波形图的标尺；图 D 是不同条件下 N2 的平均波幅值，竖线表示 95%置信区间，* $p < 0.05$，** $p < 0.01$）

N2pc 对搜索项呈现后 PO7、PO8 两个电极点上的 N2pc 波幅进行 2 精度加工需求×3 匹配情况两因素重复测量的方差分析，结果发现，精度加工需求主效应不显著，F (1, 15) = 0.22，p = 0.65；记忆项匹配情况主效应显著，F (2, 30) = 10.29，p < 0.001，η_p^2 = 0.41，匹配条件下的 N2pc（M = 0.62，95%CI: [-0.16, 1.40]）小于不匹配条件（M = -0.48，95%CI: [-1.01, 0.05]，p = 0.002）和基线条件（M = -0.72，95%CI: [-1.14, -0.30]，p = 0.004），不匹配和基线条件下的 N2pc 没有差异，p > 0.05；两因素交互作用显著，F (2, 30) = 5.59，p = 0.009，η_p^2 = 0.27。简单效应分析发现，在高精度加工需求条件下，匹配情况差异显著，F (2, 30) = 18.02，p < 0.001，匹配条件下的 N2pc（M = 0.88，95%CI: [0.07, 1.68]）小不匹配条件（M = -0.50，95%CI: [-1.12, 0.12]，p = 0.002）和基线条件（M = -1.14，95%CI: [-1.86, -0.43]，p < 0.001），不匹配条件下的 N2pc 小于基线条件（p = 0.033）；在低精度加工需求条件下，匹配情况差异不显著，F (2, 30) = 2.36，p = 0.11。见图 7D。

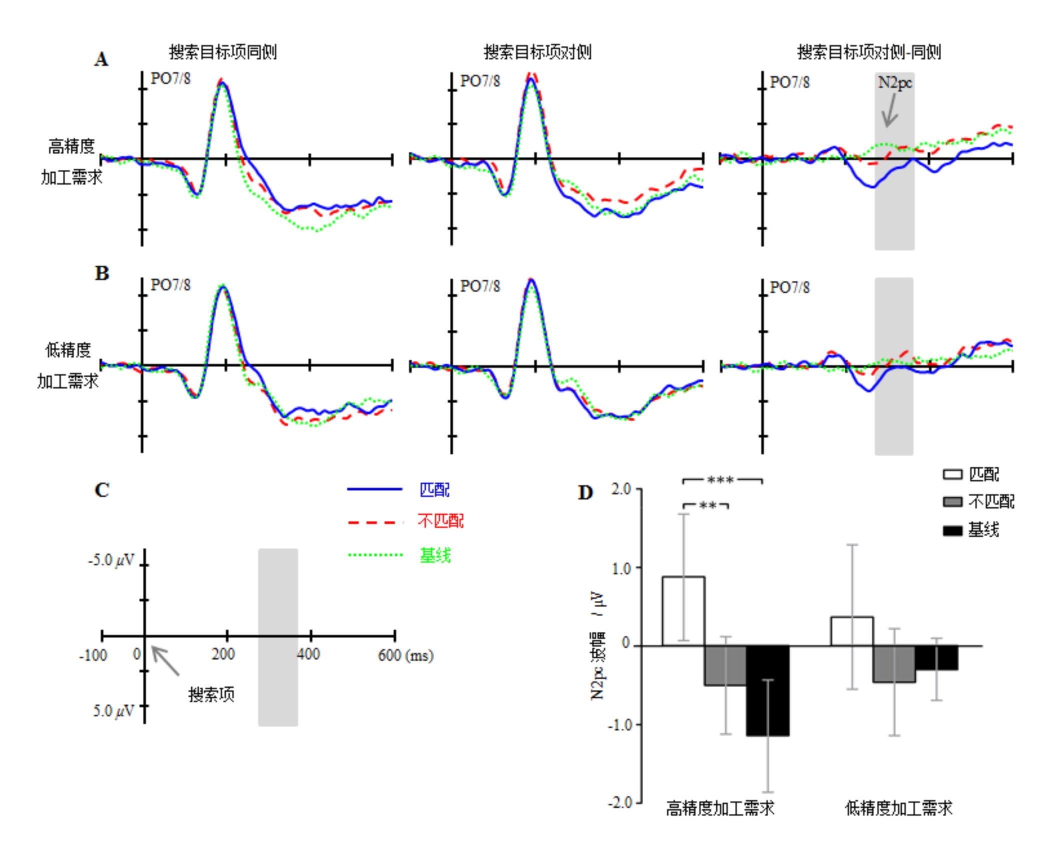


图 7 实验 4 不同条件下搜索项诱发的 N2pc 及其波幅值（图 A 是高精度加工需求条件下目标项出现同侧、对侧 PO7/8 电极点的波形图以及搜索目标项诱发的 N2pc 波形图；图 B 是低精度加工需求条件下目标项出现同侧、对侧 PO7/8 电极点的波形图以及搜索目标项诱发的 N2pc 波形图；图 C 是 N2pc 波形图的标尺，灰色区域表示 260~360 ms 时间窗口；图 D 是不同条件下 N2pc 的平均波幅值，竖线表示 95%置信区间，**$p < 0.01$，***$p < 0.001$）

5.3 讨论

采用 ERP 技术，在实验 4 中分析了不同工作记忆表征精度加工需求下，工作记忆任务和视觉搜索任务中认知资源投入情况，结果发现，与低精度加工需求条件相比，在高精度加工需求条件下，记忆项在工作记忆保持阶段诱发了较大的 NSW 和 LPC。NSW 反映了工作记忆存储过程资源的投入（Yang et al., 2015），上述结果说明高精度加工需求条件比低精度加工需求条件对记忆项的存储投入了更多工作记忆资源，与以往的研究一致（Machizawa et al., 2012）。以往研究发现，在对高精度加工需求的视觉刺激进行表征的过程中，需要激活初级视觉皮层进行知觉加工（Ester et al., 2013），对记忆项投入知觉注意资源（Zhang & Luck, 2015）。同时，高工作记忆表征精度信息的存储往往涉及前额叶与初级视觉皮层功能连接的增强（Zhao et al., 2020），前额叶能够有效追踪感觉刺激的变化，进行自上而下的认知控制，调节视觉皮层的激活，提高信息表征的稳定性（Feredoes et al., 2011; Morcos & Harvey, 2016）。LPC 反映了工作记忆存储过程中自上而下的控制（黎翠红 等, 2015; Gao et al., 2011），实验 4 结果说明高精度加工需求条件比低精度加工需求条件对记忆项的存储投入了更多认知控制资源，与以往的研究一致（He et al., 2015）。

对搜索任务过程 ERP 结果分析还发现，在搜索项呈现时，在高精度加工需求条件下，与记忆项匹配的干扰项诱发的 N2 大于与记忆项不匹配的干扰项；而在低精度加工需求条件下，与记忆项匹配/不匹配的干扰项诱发的 N2 没有差异。在高精度加工需求条件下，干扰项与记忆项匹配时，目标项诱发的 N2pc 小于干扰项与记忆项不匹配时；而在低精度加工需求条件下，干扰项与记忆项匹配和不匹配时，目标项诱发的 N2pc 没有差异。N2 反映投入冲突觉察和解决的认知资源量（Kanske & Kotz, 2010），N2pc 主要反映了完成任务过程中对目标的注意朝向或注意资源投入（Berggren & Eimer, 2018），上述结果说明在不同精度加工需求条件下，搜索任务过程中抑制干扰项以及搜索目标时，注意资源的投入与分配是不同的。

6 总讨论

采用注意捕获范式，通过变化记忆项与检测项的差异程度操纵工作记忆表征精度加工需求，探讨工作记忆表征过程中资源投入对注意引导的影响。在实验 1 中呈现 1 个记忆项，探讨不同精度加工需求下工作记忆表征对注意引导的影响；在实验 2 中呈现 2 个记忆项，通过线索操纵记忆项的表征激活状态，探讨不同表征激活状态下，工作记忆表征精度加工需求对注意引导的影响；在实验 3 中呈现 1 个或 2 个记忆项并控制匹配干扰项的数量，探讨多项目工作记忆表征对注意引导的影响；在实验 4 中采用 ERP 技术，分析工作记忆保持阶段和视觉搜索任务完成阶段的 NSW、LPC、N2 和 N2pc 成分，探讨工作记忆表征引导注意的机制。结果发现，精度加工需求影响工作记忆表征对注意的引导，并且影响能够同时引导注意的工作记忆表征数量，工作记忆表征精度加工需求和表征激活状态对注意捕获存在交互影响，在工作记忆表征以及搜索任务过程中，完成不同认知任务所需要资源是有变化的。

6.1 工作记忆表征过程资源投入对注意引导的影响

在采用注意捕获范式的实验中，彩色干扰项作为突显刺激，能够产生刺激驱动的注意引导，当彩色干扰项与记忆项匹配时，既产生刺激驱动的注意引导，也产生基于工作记忆内容的注意引导，同时该项目对目标的搜索起干扰作用（Al-Aidroos et al., 2012），因此，与不匹配干扰项相比，匹配干扰项对注意的更多捕获反映了工作记忆内容对注意的引导和认知控制的协调。在实验 1 中，我们操纵精度加工需求，在高精度加工需求条件下，工作记忆任务中的两个检测项（色块）在色环上度数相差较小，需要被试在工作记忆表征过程投入较多资源，对记忆项进行更为精确的加工，以利于完成记忆检测任务；而在低精度加工需求条件下，两个检测项在色环上度数相差较大，被试在工作记忆表征过程即使投入较少资源，也能完成记忆检测任务。结果显示，在高精度加工需求条件下基于工作记忆的注意捕获效应量大于低精度加工需求条件。主要原因是，在工作记忆表征过程中消耗较多认知资源时，用于抑制干扰的认知控制资源会降低，干扰效应增加；而在工作记忆表征过程中消耗较少认知资源时，被试拥有足够认知控制资源用于抑制干扰，干扰效应降低。

在完成工作记忆项目表征后进行搜索任务这一注意捕获范式中，资源的消耗主要包括三方面：（1）工作记忆表征加工消耗工作记忆资源（Emrich et al., 2010），（2）完成搜索任务时对干扰项的抑制消耗认知控制资源（Sawaki & Luck, 2010），（3）完成搜索任务时对目标的搜索消耗注意资源（Kahneman, 1973）。表征精度加工需求的变化主要影响工作记忆表征过程认知资源的消耗，并对随后搜索任务的完成产生影响。在实验 4 中采用 ERP 技术进行的研究发现，与低精度加工需求条件相比，高精度加工需求条件下，记忆项的存储诱发更大的反映工作记忆存储的 NSW 和反映工作记忆存储过程自上而下控制的 LPC。一方面，与低精度加工需求条件相比，在高精度加工需求条件下，工作记忆表征可能更多的激活视觉皮层对记忆项的知觉特征加工（Ester et al., 2013; Zhao et al., 2020），这消耗较多工作记忆加工资源，诱发更大的 NSW；另一方面，在高精度加工需求条件下，需要对记忆项进行更多的表征复述和刷新，这消耗更多执行注意资源（Hitch et al., 2020），诱发更大的 LPC。

当被试面对搜索任务中同时存在匹配干扰项和搜索目标这一冲突情景时，需要做出选择，N2 与冲突监控和注意控制有关，N2 波幅越大，需要投入监控、解决冲突的资源越多（Heil et al., 2000）。对 N2 分析表明，在高精度加工需求条件下，抑制匹配干扰项比抑制不匹配干扰项，被试需要投入更多资源；而在低精度加工需求条件下，抑制匹配干扰项与抑制不匹配干扰项投入的资源一样。当工作记忆表征精度加工需求增加时，在工作记忆保持阶段，对信息的存储依然需要激活初级视觉皮层（Ester et al., 2013），而初级视觉皮层的激活，有助于匹配干扰项获得竞争优势，使得视觉搜索任务中表征过项目与搜索目标的冲突增加，因此，在高精度加工需求条件下，与其他条件相比，当搜索任务中出现工作记忆表征过的项目时诱发了更大的 N2。而在低精度加工需求条件下，记忆项的存储较少激活视觉皮层，匹配干扰项没有加工优势，视觉搜索任务中工作记忆表征过项目与搜索目标的冲突减小，搜索任务中工作记忆表征过的项目诱发的 N2 与其他条件相比没有差异。从抑制的角度看，在注意捕获范式下，由于被试知道工作记忆中的项目不会成为搜索任务的目标，在搜索任务呈现后，被试会对表征过的项目进行抑制，在高精度加工需求条件下，由于工作记忆表征加工消耗较多的认知控制资源，导致抑制干扰项能力的下降，因此，与记忆项匹配的干扰项与搜索目标仍会产生较大冲突，诱发较大的 N2。

在视觉搜索任务中，被试在抑制干扰刺激的同时，需要从多个项目中寻找目标，这一搜索目标的过程需要消耗认知资源。N2pc 反映视觉搜索任务中，对目标项的注意资源投入情况，N2pc 波幅越大，投入目标搜索的资源越多（Berggren & Eimer, 2018; Eimer, 1996）。在高精度加工需求条件下，对记忆项目的表征消耗了较多的认知资源，而且，搜索任务中匹配干扰项捕获了更多注意，需要投入更多的资源用于抑制干扰项的加工，从而使得用于目标搜索的资源减少。因此，与其他条件相比，N2pc 减小。而在低精度加工需求条件下，对记忆项目的表征消耗的认知资源较少，与记忆项匹配的干扰项亦被抑制，仍有足够的资源投入到目标搜索中，诱发的 N2pc 与其他条件相比没有差异。

除此之外，工作记忆表征精度加工需求对注意引导的影响可能存在其他解释：（1）工作记忆表征精度加工需求改变知觉注意范围，从而影响对搜索目标的知觉加工。已有研究发现，高工作记忆精度加工需求（负载）能够窄化注意，使注意集中在较小的空间范围（李寿欣 等, 2019）。在视觉搜索任务中，与低精度加工需求条件相比，高精度加工需求条件下，当干扰项优先捕获注意后，较难扩大注意范围对目标项进行知觉加工，因而，对目标的搜索减慢，产生更大的注意捕获。（2）工作记忆表征精度加工需求影响神经元编码噪音，改变表征的精确性，从而影响工作记忆表征与干扰项的匹配。以往研究发现，在工作记忆任务中，当记忆项与检测项差别大（表征精度加工需求低）时，可能对记忆项进行类别记忆，使得神经元编码噪音增加，容易产生记忆偏差，降低表征精确性（Panichello et al., 2019; Schurgin et al., 2020）。因此，与高精度加工需求条件相比，低精度加工需求条件下，工作记忆表征的精确度降低，阻碍工作记忆表征与干扰项的匹配，从而降低注意捕获。对于上述两种可能的解释，需要在后续研究中做进一步探讨。

6.2 工作记忆表征激活状态和表征数量对注意引导的影响

工作记忆表征激活状态和表征数量是否影响注意引导？我们在实验 2 和实验 3 中对此进行了探讨。在实验 2 中，呈现 2 个记忆项，采用线索改变记忆项的表征激活状态，线索指向的项目处于高激活状态，结果发现，在低精度加工需求条件下，表征处于高激活状态时，匹配干扰项产生的基于工作记忆的注意捕获大于低激活状态；而在高精度加工需求条件下，表征处于不同激活时，匹配干扰项产生的基于工作记忆的注意捕获没有差异。可能的原因是，在低精度加工需求的条件下，工作记忆任务占用的资源较少，有足够的资源用于抑制搜索任务中干扰项的加工。与低激活状态的工作记忆表征相比，处于高激活状态的工作记忆表征项目，位于执行加工的焦点，表征更加稳定，不容易受到干扰（Cowan, 2011），这使得与记忆项匹配的干扰项较难进行抑制，因而，捕获更多的注意；而在高工作记忆精度加工需求的条件下，消耗较多的工作记忆资源。有研究表明，对于高精细项目的工作记忆表征，记忆 2 个客体时，已经达到工作记忆容量上限（Gao et al., 2013），这使得用于抑制干扰的资源不足，与不匹配条件相比，处于高、低激活状态与记忆项匹配的干扰项均能捕获较多的注意。

在实验 3 中，呈现 1 个或 2 个记忆项，并控制搜索任务中彩色干扰项的数量，以及干扰项与记忆项匹配的数量，结果发现，在高精度加工需求条件下，可以有两个工作记忆表征引导注意；而在低精度加工需求条件下，只有一个工作记忆表征引导注意。一方面，在不同精度加工需求条件下，工作记忆表征过程认知资源的投入不同，影响对干扰项的抑制。在高精度加工需求条件下，呈现 2 个记忆项，且 2 个记忆项均与干扰项匹配时，表征精度加工需求和表征数量的增加，消耗更多的认知资源，使得完成搜索任务时，用于抑制干扰项的资源不足，因而，两个与工作记忆表征匹配的干扰项均能捕获注意，符合多模板假设（Beck et al., 2012）；而在低精度加工需求条件下，对工作记忆表征过程的认知资源投入较少，在完成搜索任务中，仍有足够的资源用于抑制多个与工作记忆表征匹配的干扰

项，达到与抑制一个与工作记忆表征匹配的干扰项同样效果，符合单模板假设（Olivers et al., 2011）。另一方面，不同精度加工需求条件下，工作记忆表征的精确性不同，影响对干扰项的注意捕获。Duncan 和 Humphres（1989）提出，知觉项目与存储在记忆中的注意模板的匹配程度决定了对知觉项目的注意选择，匹配程度越高，知觉项目越容易成为注意选择目标。在低精度加工需求条件下，工作记忆表征数量的增加会降低表征精确性（Bae & Luck, 2017），使得干扰项与工作记忆表征的匹配程度降低，从而降低匹配干扰项对注意的捕获，表现为只有一个工作记忆表征引导注意；而在高精度加工需求条件下，投入较多资源用于工作记忆表征的复述与刷新，这有利于提高表征精确性，干扰项与工作记忆表征更容易匹配，促进干扰项对注意的捕获，表现为有多个工作记忆表征引导注意。

工作记忆过程中对记忆项表征和随后完成搜索任务时对干扰项抑制的资源如何分配，可能是造成单模板假设和多模板假设争议的原因。在注意捕获范式下，当工作记忆表征过程中认知资源占用较少，有足够资源用于抑制搜索任务中的干扰项时，工作记忆表征引导注意符合单模板假设；当工作记忆表征过程中认知资源占用较多，用于抑制搜索任务中的干扰项资源不足时，工作记忆表征引导注意符合多模板假设。

7 结论

在注意捕获范式下，与低工作记忆表征精度加工需求条件相比，高工作记忆表征精度加工需求下，工作记忆表征项目捕获更多的注意，潜在的机制可能是改变工作记忆表征精度加工需求带来认知资源分配的变化，使得投入工作记忆表征和完成搜索任务时对干扰抑制的资源发生了改变。

参 考 文 献

Al-Aidroos, N., Emrich, S., Ferber, S., & Pratt, J. (2012). Visual working memory supports the inhibition of previously processed information: Evidence from preview search. *Journal of Experimental Psychology*: *Human Perception and Performance*, *38*(3), 643–663.

Arita, J. T., Carlisle, N. B., & Woodman, G. F. (2012). Templates for rejection: Configuring attention to ignore task-irrelevant features. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *38*(3), 580–584.

Bae, G. Y., & Luck, S. J. (2017). Interactions between visual working memory representations. *Attention*, *Perception*, *& Psychophysics*, *79*(8), 2376–2395.

Bays, P. M., & Husain, M. (2008). Dynamic shifts of limited working memory resources in human vision. *Science*, *321*(5890), 851–854.

Beck, V. M., & Hollingworth, A. (2017). Competition in saccade target selection reveals attentional guidance by simultaneously active working memory representations. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *43*(2), 225–230.

Beck, V. M., Hollingworth, A., & Luck, S. J. (2012). Simultaneous control of attention by multiple working memory representations. *Psychological Science*, *23*(8), 887–898.

Berggren, N., & Eimer, M. (2018). Visual working memory load disrupts template-guided attentional selection during visual

search. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *30*(12), 1902–1915.

Cohen, J. (1992). A power primer. *Psychology Bulletin*, *112* (1), 155–159.

Cowan, N. (2011). The focus of attention as observed in visual working memory tasks: Making sense of competing claims. *Neuropsychologia*, *49*(6), 1401–1406.

Desimone, R., & Duncan, J. (1995). Neural mechanisms of selective visual attention. *Annual Review of Neuroscience*, *18*(1), 193–222.

Downing, P., & Dodds, C. (2004). Competition in visual working memory for control of search. *Visual Cognition*, *11*(6), 689–703.

Dube, B., & Al-Aidroos, N. (2019). Distinct prioritization of visual working memory representations for search and for recall. *Attention*, *Perception*, *& Psychophysics*, *81*(5), 1253–1261.

Dube, B., Basciano, A., Emrich, S. M., & Al-Aidroos, N. (2016). Visual working memory simultaneously guides facilitation and inhibition during visual search. *Attention, Perception, & Psychophysics*, *78*(5), 1232–1244.

Duncan, J., & Humphreys, G. W. (1989). Visual search and stimulus similarity. *Psychological Review*, *96*(3), 433–458.

Eimer, M. (1996). The N2pc component as an indicator of attentional selectivity. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *99*(3), 225–234.

Emrich, S. M., Al-Aidroos, N., Pratt, J., & Ferber, S. (2010). Finding memory in search: The effect of visual working memory load on visual search. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *63*(8), 1457–1466.

Ester, E. F., Anderson, D. E., Serences, J. T., & Awh, E. (2013). A neural measure of precision in visual working memory. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *25*(5), 754–761.

Fan, L., Sun, M., Xu, M., Li, Z., Diao, L., & Zhang, X. (2019). Multiple representations in visual working memory simultaneously guide attention: The type of memory-matching representation matters. *Acta Psychologica*, *192*, 126–137.

Feredoes, E., Heinen, K., Weiskopf, N., Ruff, C., & Driver, J. (2011). Causal evidence for frontal involvement in memory target maintenance by posterior brain areas during distracter interference of visual working memory. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *108*(42), 17510–17515.

Gao, Z., Ding, X., Yang, T., Liang, J., & Shui, R. (2013). Coarse-to-fine construction for high-resolution representation in visual working memory. *PLoS ONE*, *8*(2), 1–20.

Gao, Z., Xu, X., Chen, Z., Yin, J., Shen, M., & Shui, R. (2011). Contralateral delay activity tracks object identity information in visual short term memory. *Brain Research*, *1406*, 30–42.

Gunseli, E., Meeter, M., & Olivers, C. N. L. (2014). Is a search template an ordinary working memory? Comparing electrophysiological markers of working memory maintenance for visual search and recognition. *Neuropsychologia*, *60*, 29–38.

He, X., Zhang, W., Li, C., & Guo, C. (2015). Precision requirements do not affect the allocation of visual working memory capacity. *Brain Research*, *1602*, 136–143.

Heil, M., Osman, A., Wiegelmann, J., Rolke, B., & Hennighausen, E. (2000). N200 in the Eriksen-task: Inhibitory executive processes?. *Journal of Psychophysiology*, *14*(4), 218–225.

Hitch, G. J., Allen, R. J., & Baddeley, A. D. (2020). Attention and binding in visual working memory: Two forms of attention and two kinds of buffer storage. *Attention, Perception, & Psychophysics*, *82*(1), 280–293.

Hollingworth, A., & Beck, V. M. (2016). Memory-based attention capture when multiple items are maintained in visual working memory. *Journal of Experimental Psychology*: *Human Perception and Performance*, *42*(7), 911–917.

Houtkamp, R., & Roelfsema, P. R. (2009). Matching of visual input to only one item at any one time. *Psychological Research PRPF*, *73*(3), 317–326.

Hu, Y., Allen, R. J., Baddeley, A. D., & Hitch, G. J. (2016). Executive control of stimulus-driven and goal-directed attention in visual working memory. *Attention*, *Perception*, *& Psychophysics*, *78*(7), 2164–2175.

Kahneman, D. (1973). *Attention and effort* (Vol. 1063). Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.

Kanske, P., & Kotz, S. A. (2010). Modulation of early conflict processing: N200 responses to emotional words in a flanker task. *Neuropsychologia*, *48*(12), 3661–3664.

Kerzel, D., & Witzel, C. (2019). The allocation of resources in visual working memory and multiple attentional templates. *Journal of Experimental Psychology*: *Human Perception and Performance*, *45*(5), 645–658.

Kursawe, M. A., & Zimmer, H. D. (2015). Costs of storing colour and complex shape in visual working memory: Insights from pupil size and slow waves. *Acta Psychologica*, *158*, 67–77.

Li, S. X., Che, X. W., Li, Y. J., Wang, L., & Chen, K. S. (2019). The effects of capacity load and resolution load on visual selective attention during visual working memory. *Acta Psychologica Sinica*, *51*(5), 527–542.

[李寿欣, 车晓玮, 李彦佼, 王丽, 陈恺盛. (2019). 视觉工作记忆负载类型对注意选择的影响. *心理学报*, *51*(5), 527–542.]

Li, C. H., He, X., & Guo, C. Y. (2015). The storage mechanism of multi-feature objects in visual working memory. *Acta Psychologica Sinica*, *47*(6), 734–745.

[黎翠红, 何旭, 郭春彦. (2015). 多特征刺激在视觉工作记忆中的存储模式. *心理学报*, *47*(6), 734–745.]

Li, X., Ouyang, Z., & Luo, Y. J. (2010). The effect of cognitive load on interaction pattern of emotion and working memory: An ERP study. In *The 9th IEEE International Conference on Cognitive Informatics* (pp. 61–67). Beijing, China: IEEE Computer Society.

Luria, R., Sessa, P., Gotler, A., Jolicœur, P., & Dell'Acqua, R. (2010). Visual short-term memory capacity for simple and complex objects. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *22*(3), 496–512.

Machizawa, M. G., Goh, C. C., & Driver, J. (2012). Human visual short-term memory precision can be varied at will when the number of retained items is low. *Psychological Science*, *23*(6), 554–559.

Morcos, A. S., & Harvey, C. D. (2016). History-dependent variability in population dynamics during evidence accumulation in cortex. *Nature Neuroscience*, *19*(12), 1672–1681.

Olivers, C. N. (2009). What drives memory-driven attentional capture? The effects of memory type, display type, and search type. J*ournal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *35*(5), 1275–1291.

Olivers, C. N. L., Peters, J., Houtkamp, R., & Roelfsema, P. R. (2011). Different states in visual working memory: When it guides attention and when it does not. *Trends in Cognitive Sciences*, *15*(7), 327–334.

Ort, E., Fahrenfort, J. J., & Olivers, C. N. (2017). Lack of free choice reveals the cost of having to search for more than one object. *Psychological Science*, *28*(8), 1137–1147.

Panichello, M. F., DePasquale, B., Pillow, J. W., & Buschman, T. J. (2019). Error-correcting dynamics in visual working memory. *Nature Communications*, *10*(1), 1–11.

Sawaki, R., & Luck, S. J. (2010). Capture versus suppression of attention by salient singletons: Electrophysiological evidence for an automatic attend-to-me signal. *Attention*, *Perception*, *& Psychophysics*, *72*(6), 1455–1470.

Schurgin, M. W., Wixted, J. T., & Brady, T. F. (2020). Psychophysical scaling reveals a unified theory of visual memory strength. *Nature Human Behaviour*, *4*(11), 1156–1172.

Shen, M., Huang, X., & Gao, Z. (2015). Object-based attention underlies the rehearsal of feature binding in visual working memory. *Journal of Experimental Psychology*: *Human Perception and Performance*, *41*(2), 479–493.

Soto, D., Heinke, D., Humphreys, G. W., & Blanco, M. J. (2005). Early, involuntary top-down guidance of attention from working memory. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *31*(2), 248–261.

Souza, A. S., & Skóra, Z. (2017). The interplay of language and visual perception in working memory. *Cognition*, *166*, 277–297.

van Moorselaar, D., Theeuwes, J., & Olivers, C. N. L. (2014). In competition for the attentional template: Can multiple items within visual working memory guide attention? *Journal of Experimental Psychology*: *Human Perception and Performance*, *40*(4), 1450–1464.

Wen, W., Hou, Y., & Li, S. (2018). Memory guidance in distractor suppression is governed by the availability of cognitive control. *Attention, Perception, & Psychophysics*, *80*(5), 1157–1168.

Woodman, G. F., & Luck, S. J. (2007). Do the contents of visual working memory automatically influence attentional selection during visual search?. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *33*(2), 363–377.

Yang, P., Wang, M., Jin, Z., & Li, L. (2015). Visual short-term memory load modulates the early attention and perception of task-irrelevant emotional faces. *Frontiers in Human Neuroscience*, *9*, 1–12.

Zhang, W., & Luck, S. J. (2008). Discrete fixed-resolution representations in visual working memory. *Nature*, *453*(7192), 233–235.

Zhang, W., & Luck, S. J. (2011). The number and quality of representations in working memory. *Psychological Science*, *22*(11), 1434–1441.

Zhang, W., & Luck, S. J. (2015). Opposite effects of capacity load and resolution load on distractor processing. *Journal of Experimental Psychology*: *Human Perception and Performance*, *41*(1), 22–27.

Zhao, Y., Kuai, S., Zanto, T. P., & Ku, Y. (2020). Neural correlates underlying the precision of visual working memory. *Neuroscience*, *425*, 301–311.

The precision requirement of working memory representations influences attentional guidance

CHE Xiaowei, WANG Kaixuan, XU Huiyun, ZHANG Qian, LI Shouxin
(School of Psychology, Shandong Normal University, Jinan 250358, China)

Abstract

Working memory representation can guide attention toward memory-matching objects. When the memory items match the targets of visual search task, the allocation of resources in working memory (WM) influences the establishment of attentional template. The memory item that receives less WM resources than others does not guide attention, even when it is stored in WM; and two memory items that receive equal amount of WM resources guide attention simultaneously. However, it's still controversial that how WM representations guide attention when the memory items match the distractors of visual search task. Some studies found that attention cannot be guided by WM representations when it matches distractors due to cognitive control. Other studies found that attention can be guided by even two WM representations. Could the allocation of resources in WM also influence attentional guidance, when memory items match the distractors of visual search task?

In the present study, the allocation of resources in WM was manipulated by varying the precision requirement of WM representations to answer this question. Four experiments were designed in this study, and participants were asked to perform a WM task and a gap-location search task which was inserted into the maintaining interval of WM. The precision requirement of WM representation was manipulated by varying the change magnitude between two memory test items. More precise memory representations were required to detect small changes between two memory test items than large changes. In Experiment 1, participants were asked to memorize a color under high or low precision requirement. The memory color reappeared as distractors in the search task in some cases. This experiment was designed to investigate whether the memory-based attentional capture effect (capture effect) during search --an index of WM guidance-- was influenced by the precision requirement of WM representation. In Experiment 2, participants were asked to memorize two colors under high or low precision requirement. An informative cue was presented with memory colors simultaneously to indicate which color would be tested more frequently. Each color reappeared in the search task with equal chance. Experiment 2 was designed to investigate whether the memory-based attentional capture observed in Experiment 1 was related to the different states of WM representations. In Experiment 3, participants were asked to memorize one (memory-1) or two (memory-2) colors under high or low precision requirement. Zero (match-0), one (match-1), or two (match-2) memory colors reappeared as distractors in the search task. Experiment 3 was designed to investigate whether the precision requirement of WM representation influences the number of WM representations that can guide attention simultaneously. In Experiment 4, event-

related potential (ERP) technique and the same experimental design with Experiment 1 were used to explore the resource allocation during the memory task and the visual search task.

The behavioral results showed that when retaining one item in WM, the capture effect under high precision requirement was larger than that under low precision requirement. When retaining two memory items under low precision requirement, the capture effect for distractors that matched with high priority items was larger than that for distractors that matched with low priority items; while when retaining two items under high precision requirement, the capture effects for distractors that matched with high and low priority items showed no difference. Under high precision requirement, the capture effect for memory-2/match-2 condition was larger than that for memory-2/match-1 and memory-1/match-1 conditions, while under low precision requirement, the capture effect for memory-2/match-2 and memory-1/match-1 conditions showed no difference which were both larger than that for memory-2/match-1 condition. The ERP results showed that during the maintenance phase of WM, items under high precision requirement elicited larger negative slow waves (NSW) and larger late positive component (LPC) than items under low precision requirement. During the search task, larger N2 for distractors and smaller N2pc for targets were elicited when distractors matched with memory items than when distractors mismatched with memory items under high precision requirement, while equal N2 and N2pc were elicited when distractors matched and mismatched with memory items under low precision requirement.

In conclusion, WM representations under high precise requirement can guide attention more than that under low precise requirement, and its underlying mechanism is that maintaining WM representations under high precision requirement cost more resources, and therefore search targets acquire fewer resources and memory-matching distractors capture more attention.

Key words working memory representation, attentional capture, active state, distractor inhibition